

# 통신망 생존도 평가모형 및 트래픽 복구 알고리즘

正會員 박 구 현\*, 양 지 호\*\*, 이 준 원\*\*, 신 용 식\*

## Telecommunication Network Survivability Evaluation Model

Koohyun Park\*, Ji-Ho Yang\*\*, Joon-Woon Lee\*\*, Yongsik Shin\* *Regular Members*

### 요 약

본 연구에서는 생존 트래픽의 비율로 정의되는 생존도가 아닌 트래픽의 중요도에 따라 통신재난의 영향을 평가할 수 있는 척도로서 새로운 통신망 생존도 평가모형을 제시한다. 제시하는 생존도 평가척도에 근거하여 장애발생시 우회경로를 발견하고 복구 트래픽을 할당하는 최적화 모형을 수립한다. 최적화 모형은 신호복구수준과 트래픽 분할에 따라 구분되며 이들은 모두 정확한 해를 구하기 어려운 혼합정수계획문제로 표현된다. 따라서 모형별로 휴리스틱 해법을 제시하고 노드 10개, 링크 17개의 망에 적용하여 결과를 비교한다.

### ABSTRACT

The existing survivability measure is defined as the only ratio of survival traffic volume on the given traffic demand. In this paper we suggest a new network survivability evaluation model. Since it depends on the importance of traffic, we can evaluate the affect of telecommunication disaster. With the suggested evaluation model we formulate optimization models for restoration paths and traffic assignment on them. The optimization models are represented as mixed integer programming problems, which are difficult to find exact solutions. We develop heuristic algorithms according to the optimization models and apply them to an example network with 10 nodes and 17 links.

### I. 서 론

사회가 고도화되고 정보통신에 대한 사회의 의존이 증가되었기 때문에 태풍, 홍수, 화재, 지진 등의 재

난으로 통신장애가 발생하면 경제적 손실은 물론 사회적 영향이 매우 심각하다. 특히 통신링크가 광섬유로 대체되어 통신망이 고속화되면서 이러한 통신장애로부터 통신망을 보호하고 발생한 재난영향 정도를 최소화하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구에는 통신장애 정도를 나타내는 척도로서 통신망 생존도를 향상시키는 망 설계, 즉 예비용량 확보와 복구경로 설정방법을 포함한다.[9] 그러나

\*홍익대학교 산업공학과

\*\*한국전자통신연구원 초고속망연구실

論文番號:96355-1118

接受日字:1996年 11月 18日

많은 연구에서 통신망 생존도를 단순히 전체 트래픽에 대한 장애 발생후 생존 트래픽의 비로 나타내기 때문에 통신망 요소의 장애발생 확률이나 복구기간 및 트래픽의 사회적 중요성을 전혀 반영하지 못하고 있다. 또한, 통신망 생존도를 단일 링크별로 고장을 가정하고 손실 트래픽을 계산하기 때문에 대규모 재난으로부터 여러 망요소가 동시에 장애를 입는 경우 통신망 생존도는 재난 영향을 정확히 반영하지 못하고 있다.

이러한 통신망 생존도에 대해 최근 통신망 요소의 장애발생 확률을 고려하는 통신망 생존도 성능(network survivability performance) 개념이 대두되었다. [8, 11] 장애 사건별로 확률과 망장애 요소를 고려하여 장애발생 후의 생존 트래픽 비율을 확률변수로 하는 확률분포함수를 생존도 함수라 하고 이를 이용하여 기대 생존도(expected survivability), 최소 생존도(worst-case survivability),  $r$ -퍼센트 생존도를 계산하여 통신망의 생존도 속성을 다양하게 평가하였다. 또한 장애 사건별 복구기간을 고려하면 복구기간도 기대 복구기간, 최소 복구기간 및  $r$ -퍼센트 복구기간을 계산할 수 있다.

이와 같은 통신망 생존도 성능모형은 장애발생 확률을 고려함으로 생존도가 같다 하더라도 생존도 함수에 의해 평가를 달리할 수 있고 복수의 망요소 장애를 하나의 장애 사건으로 취급하여 확률을 할당함으로 대규모 재해에 대해서도 통신망 생존도를 정확히 계산해 낼 수 있다. 그러나 이와 같은 생존도 성능모형도 근본적으로 트래픽의 우선 순위를 구분함이 없이 양으로만 표현되는 트래픽 생존비율에 근거함으로 장애 대비용 예비용량을 설정할 때나 장애발생후 트래픽을 복구하려고 할 때 복구량이 같기만 하면 모든 복구방법이 동일하게 되는 문제점을 갖는다.

본 연구에서는 단지 생존 트래픽의 비율이 아닌 트래픽의 중요도에 따라 통신재난의 영향을 평가하는 척도로서 새로운 통신망 생존도 평가모형을 제시한다. 제시하는 생존도 평가척도에 근거하여 장애발생시 우회경로를 발견하고 복구 트래픽을 할당하는 최적화 모형을 수립한다. 최적화 모형은 신호복구수준과 트래픽 분할에 따라 구분되며 이들은 모두 정확한 해를 구하기에 어려운 혼합정수계획문제(mixed integer programming problem)로 표현된다. 따라서 본 연구

에서는 모형별로 발견적 해법을 제시하고 노드 10개, 링크 17개의 망에 적용하여 결과를 비교 평가한다.

본 논문의 II절에서는 트래픽의 중요도에 의한 새로운 통신망 생존도 평가척도를 제시하고, III절에서는 새로운 생존도 평가에 기초하여 장애발생시 우회 경로 및 복구 트래픽을 할당하는 최적화 모형을 수립하고 IV절에서는 이를 해결하는 휴리스틱 알고리즘을 제시한다. V절에서는 휴리스틱 알고리즘의 적용 예를 보이며 VI절은 결론이다.

## II. 새로운 생존도 평가모형

생존 트래픽의 비율에 근거하는 기존의 통신망 생존도는 트래픽의 상대적 중요성을 반영하지 못함으로 이를 가지고 통신재난 발생시 적절한 복구정책을 마련할 수 없다. 즉 기존 통신망 생존도를 이용하여 통신장애의 사회적 영향을 적절히 평가할 수 없다. 장애 트래픽이 100% 복구되는 적은 망장애의 경우라면 복구 우선순위에 대한 고려없이 어느 트래픽을 어느 경로로 복구할 것인가를 결정하면 된다. 그러나 대규모 재난에 의한 망장애라면 복구를 위한 여유용량이 충분하지 못해 결국 트래픽의 일부만이 복구될 수 밖에 없는 경우가 발생한다. 이에 대해서 트래픽의 상대적 중요도를 고려하지 않는 기존의 통신망 생존도에서는 우선순위 없이 같은 양이지만 어떤 트래픽을 복구하여도 같은 척도를 나타낸다. 그러나 통신장애는 두 노드간 트래픽의 장애정도에 따라 사회적 영향이 상당히 다르게 나타난다. 두 노드간 장애를 입지 않은 회선 비율을 회선생존율이라 할 때 회선생존율과 통신장애의 사회적 영향을 표 1에서 나타내고 있다.[2]

표 1은 동일한 양의 트래픽 복구를 전제할 때 생존율이 80%인 노드간 보다는 50%미만의 생존율을 갖는 노드간을 우선적으로 복구해야 함을 보여준다. 기존 생존도 개념으로는 어느 노드간의 트래픽을 먼저 복구하던 동일한 생존도를 보장하므로 사회적 영향의 차이를 고려할 수 없었다. 따라서 예비용량(spare capacity)을 갖는 DCS(Digital Cross-connect System) 망에서 통신망 장애로 인해 통신망 내에서 우회경로를 발견하여 트래픽을 복구하려고 할 때 사회적 영향을 반영할 수 있는 통신재난 영향평가 척도가 필요하다.

표 1. 회선생존율과 통신장애의 사회적 영향

회선생존율 %	사회적 영향
80 ~ 100	busy hour동안 활동이 부분적 영향을 받음, busy hour동안 장애가 발생하여도 이 수준의 생존율이 보장되면 특별한 트래픽 제어를 요구하지 않음
50 ~ 80	활동이 영향을 받음. 트래픽 폭주제어가 필요. 다만, low traffic hour인 경우는 트래픽 제어가 필요하지 않음
10 ~ 50	활동이 심각한 영향을 받음. 최소한의 통화를 위해 트래픽 폭주제어가 절대적으로 요구됨
0 ~ 10	사회적 활동의 완전 마비. 이용자들은 전혀 통화할 수 없음

트래픽의 중요도는 단대단(end to end) 트래픽별로 가중치를  $W_{ij}$ 로 표현한다. 즉  $W_{ij}$ 는 근원지  $i$  노드와 목적지  $j$  노드간 트래픽의 사회적 영향을 반영하기 위한 가중치로서 큰 값을 갖는 노드간 트래픽에 대해 우선적으로 복구함으로써 통신장애로부터 사회적 영향을 효과적으로 줄일 수 있다. 이러한 가중치  $W_{ij}$ 는 양 노드지역의 인구수(또는 가입자수) 및 통신 트래픽 수요량과 연관이 있어야 한다. [2]에서는 통신망의 신뢰도 설계를 위해 시스템 고장에 의한 통신장애의 잠재적 영향을 나타내는 고장크기(failure magnitude)를 식(2.1)과 같이 정보이론에 근거하여 정의한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 단대단 트래픽에 대한 가중치를 고장크기로 정의한다.

$$W_{ij} = \sqrt{n_i n_j} A_{ij} \quad (2.1)$$

단,  $n_i = i$  노드 지역의 인구수(또는 가입자수)

$n_j = j$  노드 지역의 인구수(또는 가입자수)

$A_{ij} =$  단대단  $i$  노드와  $j$  노드간 통신 트래픽 수요

따라서 식 (2.1)에서 정의한 가중치  $W_{ij}$ 와 트래픽 생존율  $S_{ij}$ 를 이용한 노드  $i-j$ 간의 새로운 재난영향 평가척도  $Q_{ij}$ 를 식(2.2)와 같이 정의한다.

$$Q_{ij} = W_{ij}^{1-S_{ij}} - 1.0 \quad (2.2)$$

그림 1은 노드  $i-j$ 간 재난영향 평가척도 함수 그

래프를 나타낸다. 새로운 재난영향 평가척도를 지수함수로 정의한 이유는 표 1의 생존회선율과 사회적 영향의 관계에 근거한다. 단대단 트래픽 생존율이 적은 구간( $0 \leq S_{ij} \leq 0.5$ )에서는 생존율이 증가함에 따라 재난영향 평가척도값이 급격히 감소하지만 비교적 큰 생존율을 가지는 구간( $0.8 \leq S_{ij} \leq 1.0$ )에서는 상당히 완만하게 함수값이 감소하기 때문이다.

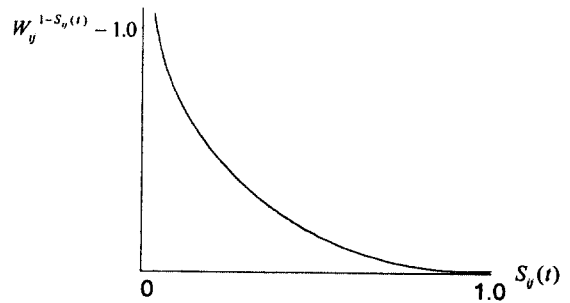


그림 1. 재난영향 평가척도 함수 그래프

따라서 재난에 의한 전체 통신망의 재난영향 평가척도는 모든 단대단별로 평가척도를 합하여 식(2.3)과 같이 정의한다. 장애받지 않은 단대단 ( $i, j$ )의 트래픽 생존율  $S_{ij}$ 는 1.0이므로 평가척도는 0이 되어 결국 식(2.3)은 장애받은 단대단별로 재난영향 평가척도를 합한 값이다.

$$\sum_{(i,j)} [W_{ij}^{1-S_{ij}} - 1.0] \quad (2.3)$$

### Ⅲ. 우회경로 발견 및 복구 트래픽 할당모형

전 절에서 새로이 정의한 재난영향 평가척도를 이용하여 장애발생시 우선순위를 가지고 단대단 트래픽별로 복구 우회경로를 발견하고 복구 트래픽을 할당할 수 있다. 기존 생존도 평가척도에 의한 우회경로 및 복구트래픽 할당과 관련된 대부분의 연구는 단대단 트래픽의 우선순위가 없이 모든 트래픽을 복구할 수 있는 경우의 링크절단과 같은 소규모 장애에 대해서 복구경로를 빨리 발견하는 연구 및 100% 복구를 보장하는 여유용량 설계 등의 연구이었다.[9] 그

러나 본 연구는 대규모 망장애로 인해서 100% 트래픽을 모두 복구할 수 없는 경우로서 복구 트래픽의 우선순위를 사회적 영향정도를 나타내는 재난영향 평가척도에 의해 결정한다. 전 절에서 보듯이 하나의 할당하므로써 우회경로와 할당 트래픽이 함께 결정된다. 따라서 지수함수 형태로 정의되기 때문에 주어진 여유 용량에 어떤 단대단 트래픽에 대해서 얼마의 양을 어느 경로로 복구할 것인가의 문제가 발생한다. 본 절에서는 DCS 복구망을 전제로 단대단별로 트래픽 수요와 예비용량이 주어져 있다고 가정하며 신호 복구 수준 및 트래픽 분할을 고려하여 우회경로 결정 및 복구 트래픽 할당모형을 수립한다.

- 신호복구수준(signal restoration level): DCS 복구망은 신호복구수준에 따라 장애링크의 양단 노드를 우회 연결하여 복구하는 회선복구(line restoration)와 장애요소를 피해 단대단(end-to-end)으로 새로운 경로를 찾아 복구하는 경로복구(path restoration)가 있다.
- 트래픽 분할(traffic splitting): 트래픽을 우회경로를 통해 복구할 때 복수의 우회경로에 트래픽을 자유롭게 분할하여 복구할 수 있는 최상분할(best splitting)과 트래픽 분할을 허용하지 않고 하나의 우회경로로만 복구하는 경우(no splitting)를 고려한다.

신호복구수준 및 복구 트래픽 분할방식을 고려하여 통신망 재난영향 평가척도를 최소화하는 우회경로 결정 및 복구 트래픽 할당 모형에는 링크흐름모형 및 패스흐름모형의 두 가지가 있다. 링크흐름모형(arc-flow formulation)은 우회경로 후보집합이 주어지지 않는 최적화 모형으로 링크별로 복구 트래픽을 할당하므로 우회경로와 할당 트래픽이 함께 결정된다. 패스흐름모형(path-flow formulation)은 우회경로 후보집합을 갖고 그 중에서 우회경로를 선정하고 복구 트래픽을 할당하게 된다. 링크흐름모형 및 패스흐름모형의 관계에 대해서는 [3]을 참조할 수 있다.

신호복구수준 및 트래픽 분할을 경로복구-최상분할로 할 때 패스흐름모형으로 모형화하기 위해 기호를 다음과 정의한다. 트래픽 단위는 DS3(또는 STS-1)로 한다.

- $G$ : 무방향(undirected) 네트워크
- $M$ : 네트워크  $G$ 의 총 링크의 수
- $F$ : 장애링크 집합으로  $F \subset \{1, 2, \dots, M\}$
- $m_j$ : 링크  $j$ 의 예비용량 ( $j = 1, \dots, M$ )
- $N$ : 재난 영향을 받은 단대단의 source-destination을 나타내는 (s-d)pair의 수
- $d_k$ : 재난영향 받은 (s-d)pair  $k$ 의 트래픽 수요 ( $k = 1, 2, \dots, N$ )
- $l_k$ : 재난 영향받은 (s-d)pair  $k$ 의 손실 트래픽 양 ( $k = 1, 2, \dots, N$ )
- $S_k$ : 재난 영향받은 (s-d)pair  $k$ 의 트래픽 생존율 ( $k = 1, 2, \dots, N$ )
- $k_s, k_d$ : 재난 영향받은 (s-d)pair  $k$ 의 source 노드, destination 노드
- $n_k, n_{k_d}$ :  $k_s, k_d$  노드지역의 가입자수 또는 인구수
- $q_k$ : (s-d)pair  $k$ 의 가중치로  $q_k = \sqrt{n_{k_s} n_{k_d} d_k}$
- $P_k$ : 재난영향을 받은 (s-d)pair  $k$ 를 연결하고 있는 경로의 수 ( $k = 1, 2, \dots, N$ )
- $d_{ik}$ : (s-d)pair  $k$ 를 연결하고 있는 경로  $i$ 에 할당되어 있는 트래픽 단위수 ( $d_k = \sum_i d_{ik}$ )
- $P$ : 복구해야 할 모든 (s-d)pair를 연결하고 있는 경로의 총수
- $R_k$ : 재난영향을 받은 (s-d)pair  $k$ 를 위한 우회경로의 수 ( $k = 1, 2, \dots, N$ )
- $y_{ik}$ : 후보경로  $i$ 에 재난영향을 받은 (s-d)pair  $k$ 를 위해 할당되는 복구 트래픽 단위수
- $R$ : 복구해야 할 모든 (s-d)pair를 연결하는 우회경로의 총수
- $A$ :  $P \times M$  행렬, 경로-링크 incidence matrix로서

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{경로 } i \text{가 링크 } j \text{를 지나면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

$B$ :  $R \times M$  행렬, 후보경로-링크 incidence matrix로서

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{후보경로 } i \text{가 링크 } j \text{를 지나면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

우회경로를 결정하고 복구 트래픽을 할당하는 패스흐름모형의 최적화 모형은 다음의 비선형 목적함수를 갖는 혼합정수계획문제(Mixed Integer Programming Problem)가 된다.

$$\text{Minimize } \sum_{k=1}^N (q_k^{1-S_k} - 1.0) \quad (3.1)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^R b_{ij} \sum_{k=1}^N y_{ik} \leq m_j + \sum_{i=1}^R a_{ij} \sum_{k=1}^N d_{ik}, \quad (3.2)$$

$$j = 1, 2, \dots, M \text{ and } j \in F$$

$$\sum_{i=1}^{R_k} y_{ik} \leq l_k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.3)$$

$$S_k = \frac{(d_k - l_k + \sum_{i=1}^{R_k} y_{ik})}{d_k}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.4)$$

$$y_{ik} \geq 0; \text{ integer, } i = 1, 2, \dots, R_k, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

식(3.1)은 목적함수로 전 절에서 정의한 통신망 재난 영향 평가척도이고, 식(3.2)는 링크의 용량제약으로 우회경로에 할당되는 트래픽의 합은 통과하는 링크의 예비용량 및 장애로 인해 이용되지 않는 경로의 용량 합계를 넘을 수 없음을 나타낸다. 식(3.3)은 재난 영향 받은 (s, d)pair별로 복구되는 트래픽은 장애로 인해 초기 손실된 트래픽 이상일 필요가 없다는 조건이다. 식(3.4)는 (s, d)pair별 트래픽 생존율은 복구되는 트래픽을 포함한 생존 트래픽의 비율이 되어야 한다는 식이다. 결정변수  $y_{ik}$ 는 트래픽 단위로 정수값을 가져야 한다. 이와 같은 비선형 목적함수의 혼합정수 계획문제는 NP-hard 문제로 정확한 해를 구하기 어려운 문제로 알려져 있다.

트래픽 분할이 허용되지 않는 경우의 경로복구 최적화 모형에서는 결정변수  $y_{ik}$ 를 새로이 정의하여야 한다. 즉, 분할을 허용하지 않음으로 우회경로  $i$ 에 재난영향을 받은 (s-d)pair  $k$ 의 트래픽  $l_k$ 가 할당되면 1이고 그렇지 않으면 0이 된다. 그러면 분할을 허용하지 않는 경로복구에 대한 최적화모형은 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \sum_{k=1}^N (q_k^{1-S_k} - 1.0) \quad (3.5)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^R b_{ij} \sum_{k=1}^N l_k y_{ik} \leq m_j + \sum_{i=1}^R a_{ij} \sum_{k=1}^N d_{ik}, \quad (3.6)$$

$$j = 1, 2, \dots, M \text{ and } j \in F$$

$$\sum_{i=1}^{R_k} y_{ik} \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.7)$$

$$S_k = \frac{(d_k - l_k(1 - \sum_{i=1}^{R_k} y_{ik}))}{d_k}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.8)$$

$$y_{ik}: 0 \text{ or } 1, \quad i = 1, 2, \dots, R_k, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

식(3-7)은 트래픽 분할을 허용하지 않기 위한 제약식이며 식(3-8)은 (s-d)pair  $k$ 에 대한 생존율로 트래픽이 할당되면 생존율은 1이 된다.

회선복구는 주로 링크절단과 같은 소규모 장애에 적합한 복구방법으로 경로복구와는 달리 장애링크 양단 노드를 우회하여 복구시킨다. 따라서 경로복구와 마찬가지로 장애링크 양단노드를 우회하는 후보 경로가 주어지면 후보 경로를 연장하여 장애링크 양단간은 우회경로로 하고 이전 부분 또는 이후 부분은 원래 경로로 하여 연장된 후보 경로를 같은 수만큼 만들 수 있다. 따라서 경로복구의 최적화모형을 적용하여 회선복구의 해를 구할 수 있다. 즉 우회경로 후보가 주어지는 경우에는 경로복구와 회선복구를 특별히 구분할 필요가 없다. 다만 트래픽 분할과 관련하여 최상분할의 경우 현실적으로 트래픽 운용에 어려움이 많을 것으로 기대되어 본 연구에서는 제외한다.

#### IV. 휴리스틱 알고리즘

전 절에서 제시된 최적화 모형은 정확히 해를 구하기 어려운 비선형 목적함수의 혼합정수계획문제이다. 문제 크기가 커질 때 시간복잡도(time complexity) 및 공간 복잡도(space complexity)가 중요하게 고려되기 때문에 이를 해결하기 위해 근사해를 구하는 휴리스틱 알고리즘이 요구된다. 본 연구에서 제시되는 알고리즘은 재난영향 평가척도, 복구우선순위표, 예비용량망(spare capacity network), KSP(K-Shortest Path) 및 KSSP(K-Successive Shortest Path)를 이용한다.

##### 4.1 복구우선순위표

복구우선순위표는 재난영향을 입은 (s, d)pair 트래픽의 복구 순서를 나타내는 표이다. 복구 트래픽 할당 알고리즘은 우선순위표를 따라가면서 (s, d)pair별로 우회경로를 결정하고 우회경로에 복구 트래픽을 할당하게 된다. 예를 들어 트래픽1은  $n_i, n_j, A_{i,j_1} = 1000$  이고, 트래픽2는  $n_i, n_j, A_{i,j_2} = 50$ 인 재난영향을 받은 2종류의 단대단 트래픽이라고 하자. 각각의 경우에 대해 단대단 트래픽 생존율  $S_{ij}$ 가 0에서 1까지 변화할 때 재난영향 평가척도값  $(n_i, n_j, A_{ij})^{\frac{1}{2}(1-S_{ij})} - 1.0$ 을

표 2. 트래픽 생존율과 재난영향 평가척도값

$S_{ij}$	재난영향 평가척도값	
	트래픽 1	트래픽 2
0.0	30.6	6.1
0.1	21.4	4.8
0.2	14.8	3.8
0.3	10.2	2.9
0.4	6.9	2.2
0.5	4.6	1.7
0.6	3.0	1.2
0.7	1.8	0.8
0.8	1.0	0.5
0.9	0.4	0.2
1.0	0.0	0.0

계산하면 표 2와 같다.

표 2에서 보듯이 트래픽1과 트래픽2가 동일한 생존율 0.2일지라도 각 재난영향 평가척도값이 다르다. 복구순서는 생존율이 아닌 재난영향 평가척도값을 기준으로 결정되어야 사회적 영향을 최소화할 수 있다. 즉, 두 가지 단대단 트래픽에 대한 재난영향 평가척도에 의한 복구우선순위 10위까지의 우선순위표를 표 3과 같다.

표 3. 평가척도에 의한 복구우선순위표

복구순서	복구 트래픽
1	생존율 0.0인 트래픽1
2	생존율 0.1인 트래픽1
3	생존율 0.2인 트래픽1
4	생존율 0.3인 트래픽1
5	생존율 0.4인 트래픽1
6	생존율 0.0인 트래픽2
7	생존율 0.1인 트래픽2
8	생존율 0.5인 트래픽1
9	생존율 0.2인 트래픽2
10	생존율 0.6인 트래픽1

복구우선순위표를 만들기 위해서는 생존율 단위를 먼저 정해야 한다. 표3에서는 생존율 단위를 0.1로 하였다. 생존율 단위로 생존율 0에서 1까지 장애받은 모든 (s, d)pair의 재난영향 평가척도의 값을 계산한

뒤 내림차순으로 복구우선순위표를 작성한다. 생존율 단위를  $\Delta$ 라고 하면 (s, d)pair k의 복구트래픽 할당 단위는  $\lceil \Delta \cdot d_k \rceil$ 이 된다. 여기서  $\lceil x \rceil$ 는 x 이상의 최소 정수를 뜻한다.

#### 4.2 예비용량망 (Spare Capacity Network)

예비용량망이란 원 통신망의 하위망(subnetwork)으로서 예비용량의 값이 양인 링크들로 구성되는 망이다. 예비용량망은 우회경로를 결정하기 위해서 필요하다. 복구를 위한 우회경로는 예비용량망에서 정의되는 경로로서 우회경로에 할당될 수 있는 최대 복구 트래픽의 양은 우회경로가 경유하는 예비용량망 링크의 최소 예비용량이 된다.

예비용량망은 우회경로를 통해 트래픽이 복구되면 복구된 트래픽만큼 우회경로를 따라 링크의 예비용량을 축소하는 갱신이 필요하다. 초기 예비용량망은 최적화모형의 식(3.2) 또는 식(3.6)의 우변에 해당되는 값으로 다음과 같이 계산한다.

- 장애를 입은 링크의 초기 예비용량은 0이다.
- 장애를 입지 않은 링크 중 재난영향을 받은 초기경로(original path)가 경유하지 않으면 초기 예비용량은 주어진 예비용량이다.
- 장애를 입지 않은 링크 중 재난영향을 받은 초기경로가 경유하면 초기 예비용량은 장애로 인해 감소되는 트래픽 용량이 주어진 예비용량에 추가된다.

#### 4.3 K-최단경로 및 K-연속최단경로

장애를 입은 (s, d)pair별 우회경로 결정은 예비용량망에서 링크 길이를 단위 길이로 생각하여 K-최단경로 및 K-연속최단경로 알고리즘을 적용한다. 단일 길이의 링크로 구한 최단경로는 최소의 hop수를 갖는 경로가 된다. K-최단경로(KSP)란 짧은 순서로 K개의 최단경로를 뜻한다. 이러한 K개의 후보경로를 통해 복구 트래픽을 할당할 수 있다. 만일 복구우선순위표에서 결정된 복구트래픽 할당단위는 K-최단경로 용량 내에서만 할당된다. K-최단경로를 통해 복구 트래픽이 할당되면 예비용량망은 갱신된다.

K-연속최단경로(KSSP)는 우회경로를 예비용량망을 갱신하면서 하나씩 연속적으로 구한 K개의 최단경로를 뜻한다. 즉, 해당 (s, d)pair의 복구 우회경로로

먼저 예비용량망의 링크를 단위 길이로 생각하여 하나의 최단경로를 구한다. 이 최단경로를 통해 복구우선순위표에서 결정된 복구트래픽 할당단위 만큼을 할당한다. 할당단위 중 일부만 할당하게 되면 예비용량망을 갱신하여 다시 최단경로를 구하고 남은 용량을 할당한다. 이와 같이 연속적으로 할당하여 최대 K개 최단경로까지만 할당한다. 우회경로를 찾기 위한 본 연구의 K-연속최단경로는 Dunn et al.[5]의 실험적 연구에 기초하고 있다. 그들은 망장에서 최대흐름경로(maximum flow routing)에 의한 복구트래픽은 연속적인 최단경로에 의해 99.9% 이상이 복구될 수 있음을 보여주는 데 이는 본 연구의 K를 가능할 때까지 증가시킨 결과에 해당된다.

DCS망에서 복구경로를 결정할 때 최단경로를 이용하는 것은 경로를 발견하는 데 걸리는 시간이 짧고 예비용량을 효율적으로 사용하기 위함이다. 따라서 실제 거리에 기초한 최단경로일 필요가 없으며 hop수에 기초한 최단경로를 이용하여도 이러한 목적은 달성된다. 최단경로를 hop수에 기초하면 최단경로를 발견하는 알고리즘의 복잡도의 차수를 낮출 수 있다. 예비용량망의 링크 수를  $m$ 이라고 할 때 최소 hop수의 최단경로는 breadth-first search[3]에 의해  $O(m)$  시간에 구해지고, K-최단경로는 Yen[10]의 알고리즘을 수정한 알고리즘[7]을 적용하면  $O(Km)$  시간에 발견할 수 있다. 또한 K-연속최단경로는 최단경로 발견 알고리즘의 K번 반복 적용이므로 K-최단경로와 같이  $O(Km)$  시간에 구해진다.

#### 4.4 알고리즘

이제 최상분할의 경로복구, 분할을 허용하지 않는 경우의 경로복구, 분할을 허용하지 않는 경우의 회선 복구 각각의 최적화 모형의 근사해를 구하는 휴리스틱 알고리즘은 다음과 같다:

**알고리즘 PRBS (Algorithm for Path Restoration with Best Splitting):** 생존율 단위  $\Delta$ 를 결정하여 재난 영향을 받은 (s, d)pair에 대해 복구우선순위표를 작성하고 복구트래픽 할당단위를 계산한다. 초기 예비용량을 계산하고 예비용량망을 얻는다. 첫번째 우선순위를 갖는 (s, d)pair에 대해서 K-연속최단경로 알고리즘을 적용한다. 첫번째 최단경로에 최대 복구트래

픽 할당단위까지 할당한다. 복구트래픽 할당단위까지 할당되지 않으면 갱신된 예비용량망에서 새로운 최단경로에 나머지 트래픽을 할당한다. 이를 반복하여 할당단위까지 복구한 뒤 다음 우선순위의 (s, d) pair로 넘어간다. 단 (s, d)pair별로 할당되는 연속적인 최단경로의 수는 최대 K이다. 복구우선순위의 마지막 (s, d)pair까지 시행한다.

**알고리즘 PRNS (Algorithm for Path Restoration with No Splitting):** 생존율 단위를  $\Delta = 1$ 로 놓고 재난 영향을 받은 (s, d)pair에 대해 복구우선순위표를 작성한다. 초기 예비용량을 계산하고 예비용량망을 얻는다. 첫번째 우선순위를 갖는 (s, d)pair에 대해서 K-최단경로 알고리즘을 적용하여 K개의 우회경로를 예비용량망에서 구한다. 복구트래픽 이상의 용량을 갖는 우회경로가 존재하면 최단경로의 우회경로에 복구트래픽을 할당하고 다음 복구우선순위의 (s, d)pair로 넘어간다. 복구트래픽 이상의 용량을 갖는 우회경로가 없으면 최대용량의 우회경로에 가능한 만큼의 복구트래픽을 할당하고 다음 복구우선순위의 (s, d)pair로 넘어간다. 복구우선순위의 마지막 (s, d)pair까지 시행한다.

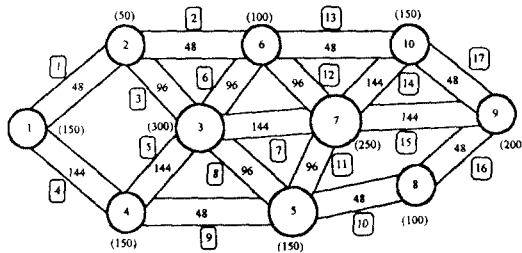
**알고리즘 LRNS (Algorithm for Line Restoration with No Splitting):** 장애링크별로 장애링크에 의해 영향받은 (s-d)pair들의 재난영향 평가척도를 합하여 복구우선순위표를 작성한다( $\Delta = 1$ ). 초기 예비용량을 계산하고 예비용량망을 얻는다. 복구우선순위에 따라 첫번째 장애링크에 대해서 K-최단경로 알고리즘에 따라 장애링크 양 노드간을 연결하는 K개의 우회경로를 예비용량망에서 구한다. 복구트래픽 이상의 용량을 갖는 우회경로가 존재하면 최단경로의 우회경로에 복구트래픽을 할당하고 다음 복구우선순위의 장애링크로 넘어간다. 복구트래픽 이상의 용량을 갖는 우회경로가 없으면 최대용량의 우회경로에 가능한 만큼의 복구트래픽을 할당하고 다음 복구우선순위의 장애링크로 넘어간다. 복구우선순위의 마지막 장애링크까지 시행한다.

전 절의 최적화모형은 우회경로의 후보 집합이 주어진 상태에서 수립된 모형인 데 반해서 위에서 제시

한 알고리즘은 K-연속최단경로 및 K-최단경로를 이용하여 우회경로를 구해가면서 복구 트래픽을 할당하기 때문에 엄밀히 말해서 최적화모형의 근사해법이 아니라고 말할 수 있다. 즉 제시된 알고리즘은 최적화모형의 전 단계를 포함하는 근사해법에 해당된다.

### V. 적용

본 절에서는 전 절에서 제시한 복구트래픽 할당 알고리즘을 적용한다. 설명의 편의를 위해 임의로 10개의 노드 및 17개의 링크를 갖는 통신망에 적용한다. 통신망 토폴로지는 그림 2와 같이 주어졌고 (s-d)pair 별 트래픽 수요 및 트래픽 수요를 연결하는 초기 연결경로는 표 4로 주어졌다고 가정한다. 그림 2의 노드 안의 숫자는 노드번호이고 괄호 안의 숫자는 해당 노드지역의 가입자 수를 표시한다. 링크내의 숫자는 링크번호이고 링크 옆의 숫자는 링크 용량으로 DS3 (또는 STS-1) 단위라고 가정한다.



링크내의 숫자 = 링크용량 ( )의 숫자 = 가입자 수  
□ 링크번호

그림 2. 통신망의 토폴로지 및 용량

표 4. 초기 연결경로 정보

패스 번호	s	d	원 연결경로	(s,d)pair 트래픽수요	
				D1	D2
1	1	10	①→④→③→⑦→⑩	100	50
2	1	6	①→②→⑥	20	10
3	1	3	①→④→③	20	10
4	2	3	②→③	60	30
5	4	9	④→⑤→⑦→⑨	40	20
6	3	6	③→⑥	20	10
7	3	10	③→⑥→⑩	20	10
8	3	5	③→⑤	60	30
9	7	8	⑦→⑤→⑧	40	20
10	3	7	③→⑦	20	10
11	6	9	⑥→⑦→⑨	60	30
12	8	10	⑧→⑨→⑩	40	20

제시한 각각의 휴리스틱 알고리즘을 Visual C++로 프로그래밍하여 예제 통신망의 경우에 적용하였다. 종류별 통신망 장애에 적용하는 과정을 통해서 각 휴리스틱 알고리즘이 최적화 모형의 근사해를 제공하는 것을 확인할 수 있었다. 각각의 알고리즘을 적용하여 복구후 생존율 및 재난영향 평가척도를 구할 때 K-최단경로(KSP)에 대해서는 K=3 으로 K-연속최단경로(KSSP)에 대해서는 K=10으로 놓았으며 알고리즘 PRBS인 경우는 복구우선순위 결정을 위한 생존율 단위를  $\Delta=0.1$ 로 놓았다.

먼저 알고리즘 PRBS가 제시하는 근사해의 근사화 정도를 확인하기 위해서 식(3.1)-(3.4)의 최적화문제의 정수조건만을 완화한(relaxed) 비선형계획문제의 GAMS/MINOS 결과와 비교하였다. GAMS는 대규모의 복잡한 수리계획문제를 쉽게 모델링하여 적용할 수 있게 World Bank에서 개발한 언어이고 MINOS는 비선형계획문제의 solver이다. 최적화모형을 적용하기 위해서 hop수로 K-최단경로 10개를 구해 이를 우회경로 후보로 사용하였다. GAMS/MINOS의 해는 실수 조건을 갖고 구한 해이기 때문에 정수해가 아닌 경우는 최적화모형의 정확한 해의 목적함수값의 상한한계(upper bound)를 제공한다. 표 5는 알고리즘 PRBS 결과와 GAMS/MINOS 결과를 비교한 표이다.

GAMS/MINOS의 최적해가 정수해인 경우는 제시된 알고리즘 PRBS의 결과와 정확히 일치하고 차이를 보인 것은 링크 4, 링크 7 및 링크 5&7의 장애의

표 5. 알고리즘 PRBS 결과 및 GAMS/MINOS의 상한한계값

장애요소	장애영향 받은 (s,d) pair	(s,d)별 생존율 및 재난영향 평가척도			
		PRBS 알고리즘 결과		GAMS/MINOS 결과	
		(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도	(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도
링크 1	(1,6)	100	0	100	0
링크 14	(1,10)	36	106.82	36	106.82
	(1,3)	20		37.7	
링크 4	(1,10)	24	498.14	20.5	405.51
	(3,7)	70		91.1	
링크 7	(1,10)	74	13.14	69.8	9.00
	(2,3)	73.3		73.3	
링크 3&8	(3,5)	53.3	35.69	53.3	35.69
	(1,10)	30		27.1	
링크 5&7	(1,3)	30	286.54	44.7	249.61
	(3,7)	100		100	
노드2	(1,6)	100	947.68	100	947.68
	(2,3)	0		0	
노드5	(3,5)	0		0	
	(4,9)	100	1892.36	100	1892.36
	(7,8)	20		20	



경우로서 이는 모두 우회경로에 실수값의 복구량이 할당된 경우이다. 표 6은 알고리즘 PRBS와 GAMS/MINOS의 차이를 보인 경우의 (s, d)별 할당된 복구 트래픽의 양을 정리한 표이다.

표 6. GAMS/MINOS 결과와 차이를 보인 경우의(s, d)별 복구량

장애요소	장애영향 받은 (s,d) pair	(s,d)별 복구량			
		알고리즘 PRBS		GAMS/MINOS 결과	
링크4	(1,3)	4	28	7.54	28
	(1,10)	24		20.46	
링크7	(3,7)	14	88	18.23	88
	(1,10)	74		69.77	
링크 5&7	(1,10)	30	56	27.06	56
	(1,3)	6		8.94	
	(3,7)	20		20	

표 7은 단일링크 장애시 (s, d)pair의 트래픽 수요가 DI인 경우에 대해 제시한 알고리즘 PRBS, PRNS 및 LRNS를 적용하여 얻은 (s, d)pair별 생존율 및 재난 영향 평가척도를 나타낸 결과이다.

링크 1의 장애에 대해서는 모든 경우의 복구방법이 100%의 생존율을 보이며 링크 4의 장애가 가장 치명적임을 알 수 있다. 단일링크 장애의 경우 PRBS가 가장 좋은 복구방법임을 알 수 있다.

표 8은 복수링크 장애시 복구방법을 비교한 결과이다. 경로복구방법이 회선복구방법보다 항상 좋은 생존율 및 재난영향 평가척도를 나타내고 있다. 또한 같은 경로복구의 경우 트래픽을 최상분할한 경우보다 분할하지 않는 경우가 장애요소에 따라 조금 나은 결과를 보인 것은 알고리즘 PRBS의 생존율 단위  $\Delta$  및 KSSP 제약으로 인한 결과이다.

표 9는 단일링크 장애시 (s-d)pair의 트래픽 수요가 표 7경우의 50%인 D2인 경우의 결과이다.

단일링크 장애의 경우 (s, d)pair의 트래픽 수요가 DI인 경우의 복구방법별 재난영향 평가척도의 값을 그래프로 비교하면 그림 3과 같다.

복수링크 장애 및 노드장애의 경우 (s, d)pair의 트래픽 수요가 DI인 경우 복구방법별 재난영향 평가척도 값을 그래프로 비교하면 그림 4와 같다.

표 7. 단일링크 장애시 복구방법 비교(KSP=3, KSSP=10, DI)

장애요소	장애영향 받은 (s,d)pair	복구방법					
		PRBS		PRNS		LRNS	
		(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도	(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도	(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도
링크1	(1,6)	100	0	100	0	100	0
링크14	(1,10)	36	106.82	28	192.55	28	192.55
	(1,3)	20		0		1141.23	
링크4	(1,10)	24	499.14	28	192.55	24	1330.56
	(3,7)	70		100		0	
링크7	(1,10)	74	13.14	28	192.55	36	1330.56

표 8. 복수링크 장애 및 노드장애시 복구방법 비교(KSP=3, KSSP=10, DI)

장애요소	장애영향 받은 (s,d)pair	복구방법					
		PRBS		PRNS		LRNS	
		(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도	(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도	(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도
링크 3&8	(2,3)	73.3	35.69	46.7	43.84	46.7	43.84
	(3,5)	53.3		26.7		26.7	
링크 5&7	(1,10)	30	286.54	28	252.68	24	1222.19
	(1,3)	30		40		0	
	(3,7)	100		100		60	
노드2	(1,6)	100	947.68	100	947.68	0	1494.4
	(2,3)	0		0		0	
노드5	(3,5)	0	1892.36	0	1910.79	0	3735.62
	(4,9)	100		60		0	
	(7,8)	20		20		0	

표 9. 단일링크 장애에서 복구방법 비교(KSP = 3, KSSP = 10, D2)

장애요소	장애영향 받은 (s,d)pair	복구방법					
		PRBS		PRNS		LRNS	
		(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도	(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도	(s,d)별 생존율(%)	재난영향 평가척도
링크1	(1,6)	100	0	100	0	100	0
링크14	(1,10)	90	1.08	76	4.78	76	4.78
링크4	(1,3)	60	27.43	0	952.46	0	952.46
	(1,10)	64		76		76	
링크7	(3,7)	100	0	100	4.78	100	0
	(1,10)	100		76		100	

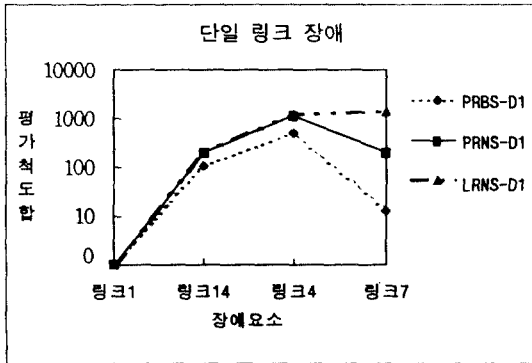


그림 3. 단일링크 장애에서 복구방법별 재난영향 평가척도

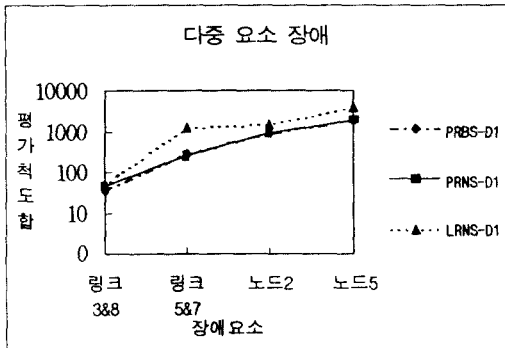


그림 4. 다중요소 장애에서 복구방법별 생존도

### VI. 결 론

생존 트래픽의 비율로만 정의되는 생존도에 의하면 장애발생시 통신재난의 사회적 영향을 정확히 파악하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 고장크기로 표

현되는 단대단 트래픽 중요도에 기초하는 새로운 통신망 생존도 평가모형을 제시하였다. 이러한 생존도 평가모형을 이용하여 장애발생시 복구해야 할 단대단 트래픽의 우선순위에 따라 우회경로를 발견하고 복구 트래픽을 할당하는 최적화 모형을 수립하였다. 최적화 모형은 신호복구수준과 트래픽 분할에 따라 최상분할이 가능한 경로복구, 분할이 허용되지 않는 경로복구, 분할이 허용되지 않는 회선복구로 구분되며 이들은 모두 정확한 해를 구하기 어려운 비선형의 혼합정수계획문제로 표현된다. 따라서 모형별로 휴리스틱 해법을 제시하였고 노드 10개, 링크 17개의 망에 적용하였다. 다양한 망장애에 대한 적용과정을 통해서 휴리스틱 해법이 비교적 최적화 모형의 근사해를 제공할 수 있음을 확인할 수 있었고 복구방법별 비교는 경로복구가 회선복구보다 우월하고 대부분의 장애에 대해서 최상분할의 경로복구가 가장 우수함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구의 휴리스틱 알고리즘을 위해 K-최단경로 알고리즘 구현에 홍익대학교 대학원생 우재현군의 도움이 있었음.

### 참 고 문 헌

1. 박구현, 이준원, "재난대비 통신망 신뢰성 확보대책", 한국통신학회지 정보통신 제12권, 제11호. 한국통신학회, 1995, 11.
2. Abe, T., Hayashi, M. and Nojo, S., "A Software Tool to Support the Reliability Design and Evaluation

of Telecommunication Networks”, IEEE JSAC pp. 345-354, 1994.

3. Ahuja, R.K., Magnanti, T.L. and Orlin, J.B., Network Flows: Theory, Algorithm, and Applications, Prentice-Hall, 1993.
4. Busche, M.T., Lockhart, C.M. and Olszewski, C., “Dynamic K-Shortest Path(DKSP) Facility Restoration Algorithm”, IEEE, 1994.
5. Dunn, D.A., Grover, W.D. & MacGregor, M.H., “Comparison of k-Shortest Paths and Maximum Flow Routing for Network Facility Restoration”, IEEE JSAC Vol. 12, No. 1, 1994.
6. Hayashi, M. and Fukuda, K., “Estimating the Restoration Speed of Telecommunication Networks after Disaster”, NOMS '94, pp. 298-308, 1994.
7. Katoh, N., Ibaraki, T. and Mine, H., “An Efficient Algorithm for K Shortest Simple Paths”, Networks, Vol. 12, pp. 411-427, 1982.
8. Liew, S.C. and Lu, K. W., “A Framework for Characterizing Disaster-Based Network Survivability”, IEEE JSAC Vol. 12, No. 1, 1994.
9. Wu, T. -H., Fiber Network Service Survivability, Artech House, Boston, 1992.
10. Yen, J.Y., “Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network”, Management Science, Vol. 17, No. 11, 1971.
11. Zolfaghari, A. and Kaudel, F. J., “Framework for Network Survivability Performance”, IEEE JSAC Vol. 12, No. 1, 1994.



**박 구 현(Koohyun Park) 정회원**  
 1957년 3월 19일생  
 1976년~1980년: 서울대학교 산업공학과 (학사)  
 1980년~1982년: 한국과학기술원 경영과학과 (석사)  
 1985년~1989년: 미국 University of Wisconsin-Madison(박사: 최적화분야)

1982년~1985년: 동아대학교 산업공학과, 전임강사  
 1989년 5월~1990년 1월: 미국 University of Wisconsin-Madison, Post-Doc.  
 1990년 2월~1991년 3월: 한국전자통신연구소 지능망

연구부 선임연구원

1991년 3월~현재: 홍익대학교 산업공학과, 부교수  
 ※관심분야: 최적화, 통신망 분석 및 설계, 트래픽 제어 및 예측



**양 지 호(Ji Ho Yang) 정회원**  
 1984년: 한국항공대학교 전자공학과(학사)  
 1990년: 한국항공대학교 전자공학과(석사)  
 1984년 3월~현재: 한국전자통신연구원 초고속정보통신연구본부 선임연구원

※주관심분야: 통신망 관리, 가상 인트라넷, 지능망, 초고속서비스 플랫폼



**이 준 원(Joon Woon Lee) 정회원**  
 1976년 2월: 서울대학교 전자공학과(학사)  
 1977년~1979년: 삼성전기(주) 근무  
 1980년~현재: 한국전자통신연구원 초고속망연구실 실장

※관심분야: B-ISDN/ATM망, 프로토콜 시험, 통신망 시뮬레이션



**신 용 식(Yong-Sik Shin) 정회원**  
 1971년 8월 24일생  
 1990년 3월~1994년 2월: 홍익대학교 산업공학과(학사)  
 1994년 3월~1996년 2월: 홍익대학교 산업공학과(석사)

1996년 3월~현재: 홍익대학교 산업공학과 박사과정  
 ※관심분야: 최적화, 초고속통신망 경로설정, 망관리